بررسی تأثیرخطای برآورد ورودی‌های طراحی روسازی بر روی خطای پیش‌بینی عمر روسازی بابهره گیری از روش شبیه‌سازی مونت کارلو*

«یادداشت پژوهشی»

حسن قاسم‌زاده[۱] علیرضا غنی‌زاده[۲]

چکیده *طرح روسازی در روش‌های مکانیکی- تجربی در معمول بر پایۀ فرض‌هایی مانند ویژگی‌های لایه‌های روسازی(ضخامت، ضریب کشسانی، ضریب پواسون و ...)، بارگذاری(وزن محور، مختصات چرخها، شمار تکرار و ...) و همچنین سازوکارهای گوناگون خرابی برای مصالح مختلف انجام می‌شود. به حقیقت پیوستن همه فرض‌ها در طراحی روسازی برای مطالعۀ عملکرد آن در سال‌های مختلف بهره‌برداری به دلیل وجود خطا در پیش‌بینی آمد و شد خودروهای گوناگون، نبود تعیین دقیق ویژگی‌های مصالح با توجه به هزینه بسیار زیاد برخی از این آزمایش‌ها و همچنین خطاها و محدودیت‌ها در مرحله اجرایی امکان‌پذیر نمی‌باشد. وجود خطا در عامل‌های ورودی طراحی روسازی سبب شده است تا در روش‌های جدید طراحی روسازی وابسته به روش مکانیکی– تجربی، فرآیند طراحی روسازی بصورت یک فرآیند غیرقطعی مطرح شود تا از این راه بتوان اثر خطای عامل‌های ورودی طراحی را بر خطای عامل‌های عملکردی روسازی بررسی و در نهایت قابلیت اطمینان طرح را وارسی کرد. با توجه به محاسبات پیچیدۀ مورد نیاز در روش‌های مکانیکی – تجربی برای تحلیل و پیش‌بینی عمر روسازی ، روش‌های سنتی بر پایۀ مشتق‌گیری را نمی‌توان برای تعیین خطای عامل‌های عملکردی روسازی مورد استفاده قرار داد. در این مقاله تأثیر خطای عامل‌های مختلف طراحی روسازی(ضریب کشسانی، ضریب پواسون، ضخامت لایه‌ها و فشار چرخ) بر روی خطای پیش‌بینی عمر خستگی و شیارشدگی روسازی با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو (Monte Carlo)مورد بررسی قرار گرفته و اثرهای هر یک از عامل‌های ارائه شده است.برای این منظور با در نظر گرفتن سه مقطع روسازی با ظرفیت سازه‌ای متفاوت، درجه اهمیت هر یک از عامل‌های ورودی بر روی قابلیت اطمینان عمر خستگی و شیارشدگی مشخص شده است. همچنین، امکان استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو در گسترش رابطه‌هایی برای پیش‌بینی خطای عمر شیارشدگی و خستگی روسازی به گونه‌ای که نیاز به شبیه‌سازی‌های آینده نباشد، بررسی شده است.*

واژه‌های کلیدی روش مکانیکی- تجربی، تحلیل خطا، شبیه‌سازی مونت کارلو، خستگی، شیارشدگی، طراحی روسازی

The effect of error in estimation of input parameters on predicting error of pavement life using Monte Carlo Simulation method

H. Ghasemzadeh A. R. Ghanizadeh

Abstract *Pavement design using mechanistic-empirical methods is often carried out based on the some assumptions for pavement layer's properties (thickness, elastic modulus, Poisson's ratio and ….), loading properties(axial weight, tire coordinates, number of repetitions and …) and also the failure mechanism for different materials. Fulfillment of these assumptions for evolution of pavement performance during service life is impossible. This is because of the uncertainty in the traffic preaiction of different vehicles,problem ofprecise determination of material specifications due to high cost of some tests and also errors and limitations in the construction phase. The error Existance in the estimation of input pavement design parameters leads to the probabilistic procedure. for the pavement design This helps the designer to study the influence of uncertainty of input parameters on the pavement performance parameters and finally controlling the design reliability. Because of the complicated computations for pavement analysis and its performance prediction, classical methods based on the deviation are not applicable to the reliability analysis of pavement performance. In this paper, the effect of the error in estimating the different input parameters of pavement design (elastic modulus, thickness and tire pressure) on prediction error of the fatigue and rutting life is studied using Monte Carlo Simulation method. For this purpose, three pavement sections with different structural capacity were considered and importance of each input parameter on prediction error of fatigue and rutting lifehave been prioritized. The possibility of using Monte Carlo simulation to develop some relationships to estimating the pavement rutting and fatigue life error has been explored. These relationships can be applied for future reliability analysis without using simulation.*

Key Words Mechanistic-Empirical Method, Error Analysis, Monte Carlo Simulation, Fatigue, Rutting, Pavement Design.

---

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۱۳۸۹/۲/۷و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۱۳۹۰/۹/۷به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده ی مسئول، استادیار ، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران

(۲) مربی، عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان

مقدمه

روش‌های مکانیکی – تجربی طراحی روسازی امروزه به‌صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند، بطوری که بسیاری از کشورها در حال حاضر طراحی روسازی‌های انعطاف‌پذیر را بر پایه این روش انجام می‌دهند [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. پیش از استفاده از این روش‌ها برای طراحی روسازی باید مسئله‌های زیادی مورد توجه قرار گیرند. از جمله مسئله‌هایی با اهمیت در طراحی روسازی به روش مکانیکی – تجربی این است که فرآیند طراحی باید عملکرد روسازی در طول عمر بهره‌برداری از روسازی در یک سطح اطمینان مشخص با توجه به سرچشمه‌های مختلف خطا در عامل‌های ورودی طراحی را تضمین کند. به سخن دیگر، طراحی روسازی یک فرآیند غیر قطعی و احتمالی است. بنابراین، تأثیر خطای ناشی از عامل‌های طراحی روسازی در پیش‌بینی عملکرد و عمر روسازی در فرآیند طراحی بایستی در نظر گرفته شود. بسیاری از روش‌ها و نرم‌افزارهای طراحی روسازی‌های انعطاف‌پذیر، طراحی روسازی را بر پایه روش‌های قطعی و بدون در نظر گرفتن خطای عامل‌های ورودی انجام می دهند. با این وجود در برخی روش‌ها و نرم‌افزارها، قابلیت اطمینان طرح و همچنین خطای ناشی از عامل‌های ورودی به عنوان یک عامل مهم در طراحی روسازی مورد نظر قرار گرفته است[2,8]. از جمله عامل‌های ایجاد خطا در طراحی و پیش‌بینی عملکرد روسازی می‌توان به موردهای زیر اشاره کرد[9]:

۱- تغییرات مکانی عامل‌های ورودی که شامل تغییر ویژگی‌های مصالح از نقطه‌ای به نقطه دیگر می‌شوند. شامل اختلاف ویژگی‌های مصالح ناشی از فرض همگن بودن مصالح لایه‌های مختلف روسازی و همچنین تغییر ویژگی‌های مقطع روسازی که به علت نبود نظارت کیفیت دقیق در هنگام ساخت روسازی می‌باشد.
۲- تغییرات ناشی از نبود تعیین دقیق ویژگی‌های کمی عامل‌های مؤثر در طراحی روسازی مانند خطاهای اتفاقی در تعیین ویژگی‌های لایه‌های مختلف روسازی یا خطا در برآورد ترافیک عبوری از روی روسازی در طول دوره عمر روسازی.
۳- استفاده از الگوهای ساده‌سازی شده و همراه با خطا برای تحلیل روسازی.
٤- خطاهای آماری در هنگام گسترش الگوهای عملکردی روسازی با توجه به کمبود اطلاعات.

عامل‌های ایجاد خطای اول و دوم با عنوان نبودن قطعیت عامل‌های ورودی طراحی شناخته می‌شوند. این عامل‌ها نشان‌دهندهٔ نبود انطباق ویژگی‌های میدانی و ویژگی‌های فرضی در طراحی روسازی می‌باشند. عامل‌های ایجاد خطای سوم و چهارم با عنوان خطای سازمان یافته شناخته می‌شوند که سبب منطبق نشدن عملکرد پیش‌بینی شده و مشاهده‌شدهٔ روسازی می‌شوند.

در این مقاله هدف تحلیل حساسیت و بررسی تأثیر خطای عامل‌های ورودی طراحی روسازی بر روی خطای پیش‌بینی عملکرد و عمر خستگی و شیارشدگی روسازی است. برای این منظور سه مقطع روسازی با مقاومت بالا، متوسط و پایین در نظر گرفته شده‌اند. سپس برای هر یک از این تأثیر ناشی از قطعی نبودن ویژگی‌های طراحی روسازی (ضریب کشسانی لایه‌های مختلف، ضخامت لایه‌های مختلف، ضریب پواسون لایه‌های مختلف و فشار چرخ) بر روی پیش‌بینی عمر خستگی و شیارشدگی روسازی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

نبود قطعیت و تغییرپذیری عامل‌های ورودی طراحی روسازی

برای بررسی اثر خطای حاصل از عامل‌های ورودی طراحی روسازی بر روی خطای پیش‌بینی عمر خستگی و شیارشدگی روسازی نیاز است تا ابتدا ویژگی‌های آماری عامل‌های ورودی طراحی روسازی مشخص شود. در ادامه به برخی مطالعه‌های انجام شده در این باره اشاره خواهد شد.

Al-sugair و همکاران ضریب کشسانی نمونه‌های بتن آسفالتی را در سطوح مختلف بارگذاری، وضعیت رطوبتی و طرح‌های اختلاط مختلف به‌صورت

آزمایشگاهی انـدازه‌گیـری و ضـریب تغییـرات (نسـبت انحراف معیار به مقدار متوسـط) را برابـر بـا ۱۰ الـی ١٦ درصـد تعیـین کردنـد[10]. Brownو Foo [١١] مطالعـه مشابهی را بر روی طرح‌های اختلاط مختلف بتن آسفالتی انجام دادند و ضـریب تغییـرات ضـریب کشسـانی را در محدوده ٦ الـی ۱۰ درصـد پیشـنهاد نمودنـد. در مطالعـه دیگری که بر روی مغزه‌های به‌دست آمـده از ۳۲ سـایت مختلف LTPP انجام پذیرفت، ضریب تغییـرات ضـریب کشسانی بتن آسفالتی رویه بین ۱ الـی ٤٥ درصـد تعیـین شد [12]. Allen و همکاران [۱۳]، تغییرات مکانی شریب کشسانی بتن آسفالتی را از طریق دستگاه FWD در نقـاط مختلف یک راه اندازه‌گیری و ضریب تغییرات این کمیت را بین ۱۵ الی ٧٦ درصد پیشنهاد کردند. پژوهش دیگـری که Noureldin [١٤] بر روی ضریب کشسـانی بـه‌دسـت آمده از دستگاه FWD در سـطح‌هـای مختلـف بـار و در درجه حرارت‌های گوناگون انجام داد، ضـریب تغییـرات ضریب کشسانی مصالح بتن آسـفالتی را بـین ۲۰ الـی٤٠ درصد تعیین کرد. در پژوهشی که NCHRP [١٥] بر روی تغییرپذیری ضریب کشسـانی لایـه‌هـای مختلـف مقـاطع LTPP انجـام داده اسـت، ضـریب تغییـرات و همچنـین انحراف معیار متوسط برای لایه‌هـای مختلـف بـه‌دسـت آمده که در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱ مقایسه انحراف معیار و ضریب تغییرات ضریب کشسانی مصالح مختلف [15]

مصالح	انحراف معیار متوسط	ضریب تغییرات (درصد)
بتن آسفالتی	٥١٣٧	٣٦
اساس سنگدانه‌ای	٥٧٨	٤٢
زیر اساس سنگدانه‌ای	۱۹۲۲	٦٣
خاک بستر	۱۲۱۱	٤٦
اساس تثبیت شده	۳۲۷٥	٤٩
زیر اساس تثبیت شده	٢١١٤	٦٧

شکل تابع چگالی احتمال بـرای ضـریب کشسـانی مصالح روسازی به‌صورت نرمال لگاریتمی در نظر گرفتـه می‌شود [8].

ضریب پواسون، همانند سـایر عامـل‌هـای طراحـی روسازی یک متغیر اتفاقی است که مـی‌توانـد دارای یـک تابع احتمال مشخص باشد. با این وجود، به دلیل مشـکل بودن اندازه‌گیری این عامل‌هـای درمعمـول از مقـدارهای پیش‌فرض برای این عامل استفاده می‌شود. در جدول‌های (۲) و (۳) مقدارهای نمونهٔ ضریب پواسون برای مصـالح مختلف آمده شده است. شکل تابع چگالی احتمال بـرای ضـریب پواسـون مصـالح روسـازی بـه‌صـورت نرمـال لگاریتمی در نظر گرفته شده است.

ضخامت لایه‌های مختلـف روسـازی بـا توجـه بـه محدودیت ها وکیفیت اجرایی در نقاط مختلف، متفـاوت خواهد بود. از همین رو، به عنوان یـک عامـل غیرقطعـی باید در نظر گرفته شود. در مطالعـه‌ای کـه بـا اسـتفاده از دستگاه GRP در ایالـت کـانزاس بـرای تعیـین تغییـرات ضخامت کل روسـازی انجـام گرفـت، ضـریب تغییـرات ضخامت کل روسازی بین ۱/۱ الـی ۱۸/۲ درصـد تعیـین شـد [18]. ضــریب تغییــرات پیشــنهادی برخــی از پژوهشگران برای ضخامت لایه‌های مختلف روسـازی در جدول (٤) آمده است.

جدول ۲ ضریب پواسون مصالح روسازی [16]

مصالح	دامنه تغییرات ضریب پواسون	مقدارهای نمونه
بتن آسفالتی	وابسته به درجه حرارت ۰/۲۵ در درجه حرارت ٤ درجه سانتیگراد ۰/۵۰ در درجه حرارت ٦٠ درجه سانتیگراد	۰/۳۵ در درجه حرارت ۲۵ درجه سانتیگراد
مصالح تثبیت شده با سیمان	۰/۲۵–۰/۱۰	۰/۱۵
مصالح سنگدانه‌ای	۰/۵۰–۰/۲۰	۰/۵۰(چسبنده) ۰/۳۰(غیر چسبنده)

جدول ۳ ضریب پواسون انواع خاک‌ها [17]

نوع خاک	دامنه تغییرات ضریب پواسون
ماسه شل	۰/۴۰–۰/۲۰
ماسه متوسط	۰/۴۰–۰/۲۵
ماسه متراکم	۰/۴۵–۰/۳۰
ماسهٔ رس‌دار	۰/۴۰–۰/۲۰
رس نرم	۰/۲۵–۰/۱۵
رس متوسط	۰/۵–۰/۲۰

جدول ٤ مقایسه انحراف معیار و ضریب تغییرات ضخامت لایه‌های مختلف روسازی [19]

مصالح	انحراف معیار متوسط	ضریب تغییرات (درصد)
بتن آسفالتی	رویه	۱۲–۳
بتن آسفالتی	اساس	۱۵–۵
مصالح سنگدانه‌ای	اساس	۱۵–۱۰
مصالح سنگدانه‌ای	زیراساس	۲۰–۱۰

در پـژوهش دیگـری کـه روی مقطـع‌هـای LTPP انجام شده ، ضریب تغییرات ضخامت لایه‌هـای مختلـف روسازی مطابق جدول (۵) پیشنهاد شده است [۱۵].

شکل تابع چگالی احتمال برای ضخامت لایـه‌هـای مختلف روسازی بر اساس بررسی‌های بـه‌دسـت آمـده از اجرای مقطع‌های LTPP به‌صورت نرمال بوده است [15]. همچنین، در پـژوهش دیگـری کـه در ایالـت کارولینـای جنوبی انجام پذیرفته، شکل تابع چگالی احتمال ضخامت لایـهٔ رویـه بـه‌صـورت لگـاریتم نرمـال پیشـنهاد شـده است[20].

بررسی‌های انجـام شـده در ایالـت هـای مختلـف آمریکا در رابطه با تغییـرات فشـار چـرخ در جـدول (٦) درج شده اند. شکل تابع چگالی احتمال وابسته بـه فشـار چرخ به‌صورت نرمال پیشنهاد شده است [8,15].

جدول ۵ مقایسه انحراف معیار و ضریب تغییرات ضخامت لایه‌های مختلف روسازی مصالح مختلف [15]

مصالح	ضخامت(cm)	COV	ضریب تغییرات(درصد)	ضخامت(cm)	COV
اساس سنگدانه‌ای با دانه‌بندی متراکم	٤	۱۱/۱	اساس تثبیت شده با قیر	۸	٤/۱
اساس سنگدانه‌ای با دانه‌بندی متراکم	۸	۵/۷	اساس تثبیت شده با قیر	۱۲	۳/۲
اساس سنگدانه‌ای با دانه‌بندی متراکم	۱۲	٤/۰	بتن آسفالتی+ قشر اصطکاکی	٤	٦/۷
اساس نفوذپذیر تثبیت شده با قیر	٤	۷/۸	بتن آسفالتی+ قشر اصطکاکی	۷	٢٤/۰
اساس تثبیت شده با قیر	٤	٦/۹			

جدول ٦ مقایسه انحراف معیار و ضریب تغییرات فشار چرخ [8]

ایالت(مرجع)	فشار
Texas	بیشترین فشار برابر با۱۰۳۵ کیلوپاسکال
Montana	۸۱ درصد تایرها از نوع رادیال با فشار متوسط ۷۲۵ کیلوپاسکال ۱۷ درصد تایرها از نوع Bias Ply با فشار متوسط ۵۸۰ کیلوپاسکال
Illinois	فشار متوسط برابر با ٦۷۰ کیلو پاسکال. دامنه تغییرات فشار از ۳٦۰ تا ۹۰۰ کیلوپاسکال
Oregon	۸۷ درصد تایرها از نوع رادیال با فشار متوسط ۷۰۵ کیلوپاسکال ۱۳ درصد تایرها از نوع Bias Ply با فشار متوسط ٥٦٥ کیلوپاسکال ضریب تغییرات ۹ الی ۲۰ درصد تابع چگالی احتمال فشار بصورت نرمال
Texas	فشار متوسط تایرهای رادیال برابر با ٦۷۰ کیلوپاسکال فشار متوسط تایرهای Bias Ply برابر با ۵۹۰ کیلوپاسکال ضریب تغییرات برابر با ۱۵ الی ۲۰ درصد

روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو

شبیه سازی مونت کارلو یک روش تکراری برای ارزیابی الگوهای احتمالی بر پایه مجموعه‌ای از عددهای اتفاقی به عنوان ورودی‌ها است. این روش بیشتر در مورد الگوهای پیچیده، الگوهای غیرخطی یا الگوهایی که بیش از دو عامل ورودی دارند، به‌کار می‌رود. شبیه‌سازی می‌تواند برای نمونه شامل بیش از ده‌ها هزار بار اجرای الگو باشد که این امر بدون بهره‌گیری از رایانه‌های پر سرعت امکان پذیر نیست. از همین رو، پیشرفت این روش نتیجه پیشرفت در سخت افزار و نرم افزارهای رایانه‌ای است. این روش را نخستین بار Valm .sو Nicholas Metropolis در سال ۱۹٤۹ در بازی‌های وابسته به بخت و اقبال مورد استفاده قرار گرفت و امروزه در بسیاری از رشته‌های مهندسی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سامانه‌های پیچیده به کار می‌رود [21].

روش شبیه‌سازی مونت کارلو در دسته روش‌های نمونه برداری طبقه‌بندی می‌شود. زیرا در این روش ورودی‌ها به‌طور اتفاقی بر اساس تابع چگالی آماری آن ورودی تولید می‌شوند تا فرآیند نمونه‌برداری از یک جمعیت واقعی را شبیه‌سازی کنند. بنابراین در این روش باید توزیع آماری هر یک از عامل‌های ورودی به گونه‌ای انتخاب شود که بیشترین انطباق را با شرایط واقعی عامل مورد نظر داشته باشد. با داشتن الگوی حاکم بر سیستم و همچنین توزیع آماری هر یک از عامل‌های ورودی می‌توان با بهره گرفتن از روش شبیه‌سازی مونت کارل توزیع آماری هریک از عامل‌های خروجی یا به صورت ساده‌ترمقدار متوسط و انحراف معیار هر یک از عامل‌های خروجی الگوی مورد نظر را محاسبه کرد.

مرحله‌های روش شبیه‌سازی مونت کارلو را می‌توان در گام‌های زیر خلاصه کرد:

گام ۱. تعیین الگو حاکم بر سامانه، $y = f(x_1, x_2, ...)$

گام۲. ایجاد مجموعه‌ای از ورودی‌ها بر اساس تابع چگالی احتمال هر یک از ورودی‌ها، $(x_1, x_2, ...)$

گام ۳. حل کردن الگو بر اساس هر یک از مقدارهای ورودی و ذخیره کردن نتیجه‌های خروجی،y_i.

گام ٤. تکرار گام‌های ۲ و ۳ به ازای مجموعه ورودی‌های مختلف i= 1:n

گام ٥. تحلیل خروجی‌ها با استفاده از نمودار میله‌ای (Hystogram)، کمیت های آماری(انحراف معیار)، فاصله‌های اطمینان و غیره.

همان‌گونه که اشاره شده شکل تابع چگالی احتمال ورودی‌های طراحی روسازی درمعمول به دو صورت نرمال و لگاریتم نرمال در نظر گرفته می‌شود. در هر تکرار شبیه سازی به روش مونت کارلو باید بر اساس عامل‌های معرف شکل تابع چگالی احتمال عامل ورودی (مقدار متوسط و انحراف معیار)، بصورت تصادفی یک مقدار برای عامل‌های مورد نظر تولید شود. از رابطه‌های زیر می‌توان برای شبیه‌سازی داده‌های با شکل تابع چگالی نرمال بهره گرفت:

$$S = \sqrt{-2 \times \log(U_1)} \times \cos(2\pi \times U_2) \qquad (۱)$$

یا

$$S = \sqrt{-2 \times \log(U_1)} \times \sin(2\pi \times U_2) \qquad (۲)$$

$$N = \mu + \sigma S \qquad (۳)$$

که در این رابطه‌ها:

U_1 و U_2:دو عدد تصادفی در بازه ۰ و ۱.

S: متغیر نرمال استاندارد.

N: مقدار شبیه‌سازی شده برای عامل مورد نظر با تابع چگالی احتمال نرمال.

σ: انحراف معیار عامل مورد نظر.

μ: متوسط عامل مورد نظر.

از رابطه‌های زیر می‌توان برای شبیه‌سازی داده‌های با شکل تابع چگالی لگاریتم نرمال استفاده کرد:

$$\sigma_x = \sqrt{\ln\left[\left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2 + 1\right]} \qquad (٤)$$

$$\mu_x = \ln(\mu) - \frac{\sigma_x^2}{2} \quad (5)$$

$$LN = e^{\mu_x + \sigma_x S} \quad (6)$$

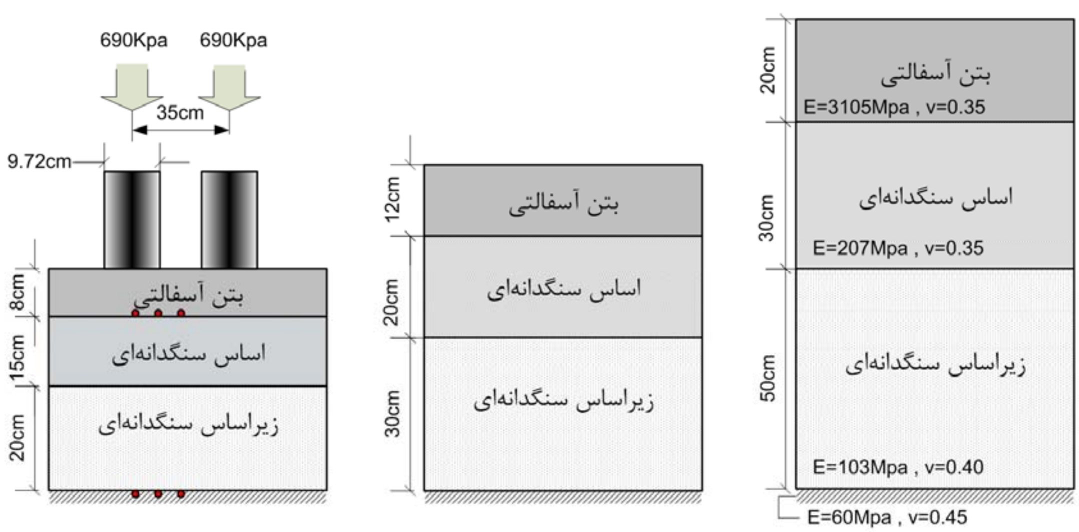
که در این رابطه‌ها:

LN:مقدار شبیه‌سازی شده برای عامل مورد نظر با تابع چگالی احتمال لگاریتم نرمال.

برای اجرای فرآیند شبیه‌سازی یک برنامه رایانه‌ای گسترش داده شده است. این برنامه بر پایه کلاس تحلیل سامانه‌های کشسان چند لایه‌ای ClassLESA نوشته شده است.کلاس ClassLESA بر اساس نظریهٔ کشسان چند لایه‌ای برمسیتر و به‌صورت یک تابع کتابخانه‌ای DLL با هدف تحلیل سامانه‌های کشسان چندلایه‌ای زیر اثر بارگذاری دایره‌ای گسترش یافته است. با استفاده از این کلاس می‌توان یک سامانه کشسان خطی ۱۰ لایه را حداکثر تحت اثر ۱۰ سطح بارگذاری دایره‌ای تحلیل کرد و واکنش ها را در٤۰۰ نقطه مختلف از روسازی به‌دست آورد. این تابع DLL را می‌توان در زبان‌های برنامه‌نویسی شیء گرا به کار برد. مقایسهٔ نتیجه‌های حاصل از کلاس ClassLESA و برنامه‌های KENLAYER و WinJULE نشان دهندهٔ برابری بسیار خوب پاسخ های به‌دست آمده می‌باشد [۲۲].

تحلیل حساسیت و بررسی اثر خطای ورودی‌ها در پیش بینی عمر خستگی و شیار شدگی روسازی

برای بررسی خطای ورودی‌های طراحی روسازی بر روی خطای پیش بینی عمر خستگی و شیار شدگی روسازی، سه مقطع روسازی مختلف با مقاومت بالا، مقاومت میانگین و مقاومت پایین برابر شکل (۱) در نظر گرفته شد. ویژگی‌های متوسط در نظرگرفته شده برای مصالح روسازی و همچنین روش بارگذاری در شکل (۱) نمایش داده شده است. بارگذاری با استفاده از یک محور ۸/۲ تنی استاندارد با چرخ زوج انجام شده است و برای تعیین کرنش های بحرانی، پاسخ‌ها در سه نقطهٔ تار پایین لایه بتن آسفالتی و سه نقطه بالای لایه خاک بستر (نقطه‌های مرکز چرخ، لبه چرخ و فاصله بین دو چرخ)، مانند شکل، محاسبه شدند تا بیشترین مقدار از بین این سه مقدار برای برآورد عمر خستگی و شیارشدگی روسازی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱ مقطع‌های مختلف روسازی (به ترتیب از چپ به راست مقطع‌های ۱ ، ۲ و ۳) و چگونگی بارگذاری فرضی در پژوهش

برای پیش بینی عمر خستگی و شیار شدگی روسازی از رابطه‌های انستیتو آسفالت به‌صورت زیر استفاده شده است:

$$N_f = 0.0796(\varepsilon_t)^{-3.291}(E_{AC})^{-0.854} \quad (٦)$$

$$N_R = 1.365\times10^{-9}(\varepsilon_c)^{-4.477} \quad (٧)$$

در رابطه‌های بالا :

N_f و N_R: به ترتیب عبارتند از تعداد عبور مجاز وابسته به عمر خستگی و شیارشدگی.

ε_t: بیشترین کرنش کششی تار پایین لایه بتن آسفالتی.

ε_c:بیشترین کرنش فشاری روی خاک بستر.

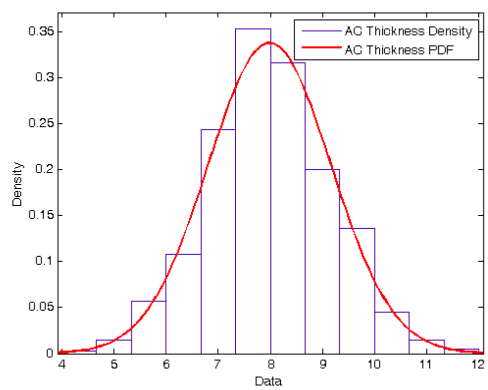
E_{AC}:ضریب کشسانی بتن آسفالتی بر حسب پوند بر اینچ مربع.

سه مقطع آورده شده در شکل (۱) با هدف بررسی قابلیت اطمینان طراحی در روسازی‌های با ظرفیت‌های سازه‌ای مختلف در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به معیارهای خستگی و شیارشدگی انستیتو آسفالت و تحلیل مکانیکی این سه مقطع، عمر خستگی این سه مقطع به ترتیب برابر با ۲۷۰۰۰۰، ۸۸۰۰۰۰ و ٦٤۰۰۰۰۰ و عمر شیارشدگی این سه مقطع به ترتیب برابر با ۵۰۰۰۰۰۰۰، ۵۰۰۰۰۰۰ و ۳۳۰۰۰۰ عبور محور ۸/۲ تنی استاندارد تعیین می‌شود.

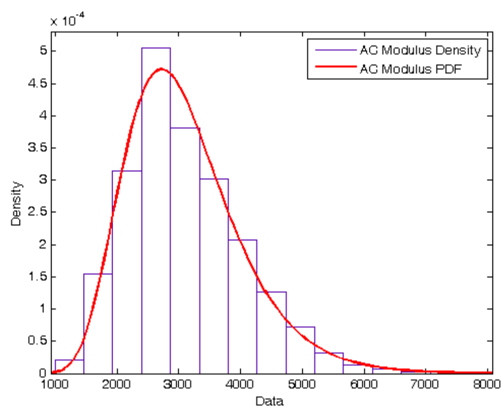
برای بررسی تأثیر خطای هر یک از عامل‌های ورودی‌طراحی به‌صورت جداگانه بر روی خطای پیش‌بینی عمر خستگی و شیارشدگی روسازی شبیه‌سازی هر یک از مقطع‌ها با توجه به عامل‌های نشان داده شده در جدول (۷) انجام شد. در این حالت به علت تک عاملی بودن مسأله و نبود پیچیدگی زیاد، شبیه‌سازی به شمار ۱۰۰۰ مرتبه انجام شد. همچنین، برای اطمینان از شکل صحیح تابع چگالی احتمال ورودی مورد نظر(ضریب کشسانی، ضخامت، ضریب پواسون یا فشار چرخ) مقدارهای اتفاقی تولید شده از شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفتند. برای نمونه شکل تابع چگالی احتمال برای ضریب کشسانی و ضخامت لایه آسفالت رویه برابر شکل (۲) و (۳) می‌باشد که نشان دهندهٔ برابری توزیع آماری مقدارهای این دو عامل با تابع چگالی هدف می‌باشد.

جدول ۷ تابع چگالی احتمال و حدود ضریب تغییرات برای متغیرهای ورودی مختلف

نوع مصالح	شکل تابع چگالی احتمال	حدود ضریب تغییرات
ضریب کشسانی	لگاریتم نرمال	٪۱۰–٪٦۰
ضخامت	نرمال	٪۵–٪۲۵
ضریب پواسون	لگاریتم نرمال	٪۲–٪۱۸
فشار چرخ	نرمال	٪۵–٪۲۵

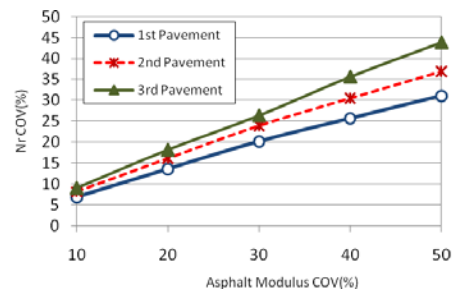


شکل ۲ تابع توزیع احتمال لگاریتم نرمال برای ضریب کشسانی لایه بتن آسفالتی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی

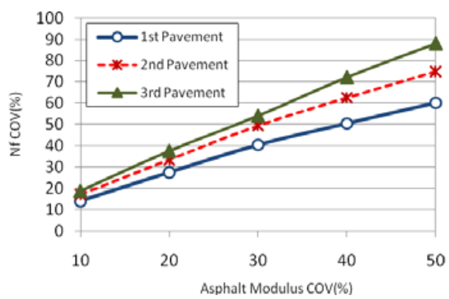


شکل ۳ تابع توزیع احتمال نرمال برای ضخامت لایه بتن آسفالتی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی

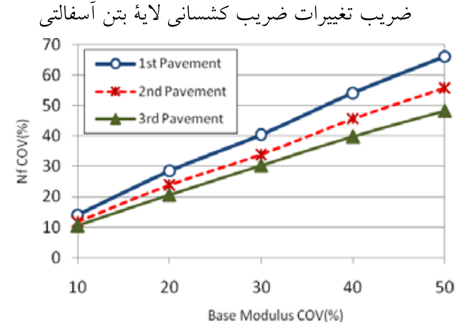
شکل‌هـای (٤) الـی (١١) تـأثیر خطـای حاصـل از ضریب کشسانی هر یـک از لایـه‌هـا را بـر روی خطـای برآورد عمر خستگی و عمر شیارشـدگی روسـازی نشـان مـی‌دهنـد. مـی‌تـوان نتیجـه گرفـت کـه در سـاختارهای ضخیم‌تر روسازی تأثیر خطای حاصل از بـرآورد ضـریب کشسـانی لایـه آسـفالتی بـر روی خطـای بـرآورد عمـر خستگی و شیارشدگی بیشـتر از سـاختارهای ضـعیف‌تـر روسازی است. در مورد خطای ضـریب کشسـانی دیگـر لایه‌ها (اساس، زیراساس و خاک بستر) هر چـه سـاختار روسازی ضعیف‌تر باشد، این تأثیر بیشتر اسـت. همچنـین دیده می‌شود که خطای ضریب کشسـانی لایـه‌هـای بـتن آسفالتی رویه و اساس بیشتر از عمر شیار شدگی بر روی برآورد دقیق عمر خسـتگی روسـازی اثـر مـی‌گـذارد. در صورتی که خطای ضریب کشسانی لایه‌های زیراسـاس و خاک بستر بیشتر از عمر خستگی بـر روی بـرآورد دقیـق عمر شیارشدگی تأثیر دارد. بنابراین، بـرای وارسـی دقیـق عمر خستگی باید ضریب کشسانی لایه‌های بالایی و برای وارسی دقیـق عمـر شیارشـدگی بایـد ضـریب کشسـانی لایه‌های پایینی به‌طور دقیق تعیین و وارسی شوند.



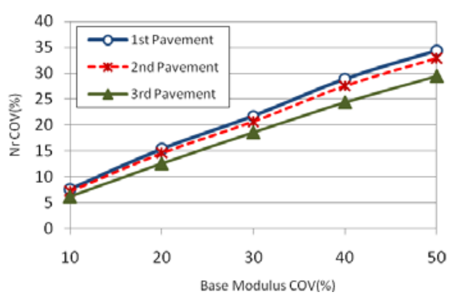
شکل ٤ ضریب تغییرات عمر خستگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات ضریب کشسانی لایهٔ بتن آسفالتی



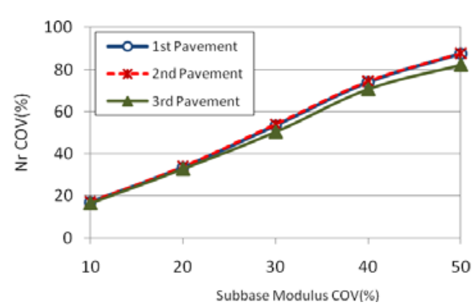
شکل ٥ ضریب تغییرات عمر شیارشدگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات ضریب کشسانی لایهٔ بتن آسفالتی



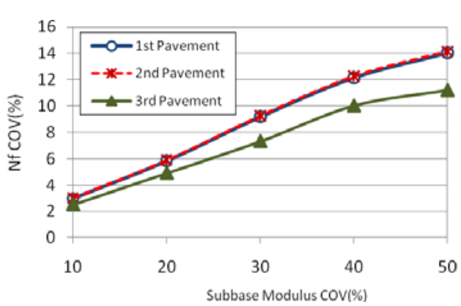
شکل ٦ ضریب تغییرات عمر خستگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات ضریب کشسانی لایهٔ اساس



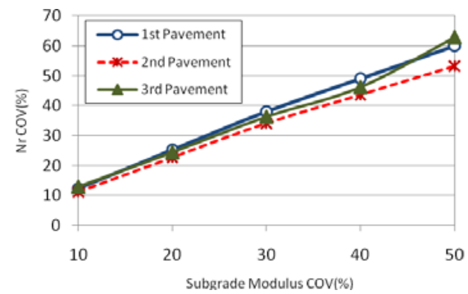
شکل ٧ ضریب تغییرات عمر شیارشدگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات ضریب کشسانی لایهٔ اساس



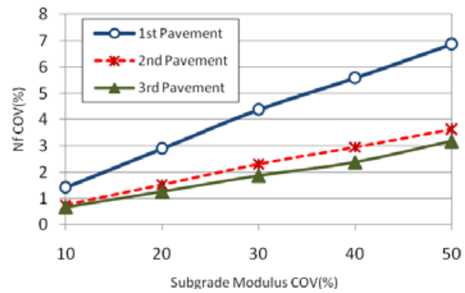
شکل ٨ ضریب تغییرات عمر خستگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات ضریب کشسانی لایهٔ زیراساس



شکل ٩ ضریب تغییرات عمر شیارشدگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات ضریب کشسانی لایهٔ زیراساس

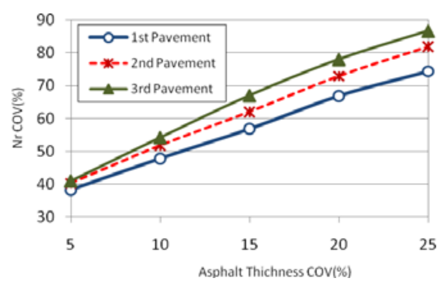


شکل ۱۰ ضریب تغییرات عمر خستگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات ضریب کشسانی خاک بستر

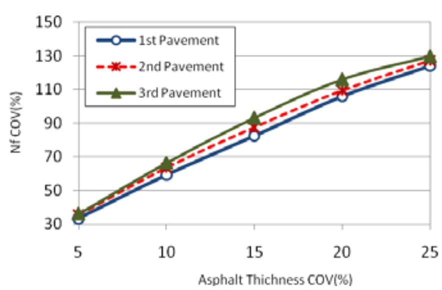


شکل ۱۱ ضریب تغییرات عمر شیارشدگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات ضریب کشسانی خاک بستر

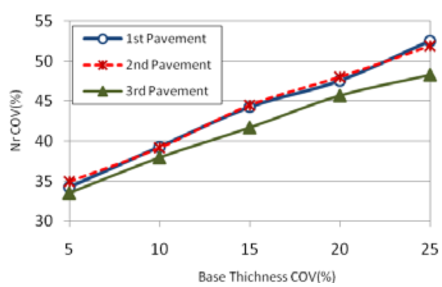
شکل‌های (۱۲) الی (۱۷) تـأثیر خطـای حاصـل از ضریب کشسانی هر یـک از لایـه‌هـا را بـر روی خطـای برآورد عمر خستگی و عمر شیارشـدگی روسـازی نشـان می‌دهنـد. در مـورد خطـای حاصـل از اجـرای ضـخامت لایه‌ها نیـز مـی‌تـوان نتیجـه گرفـت کـه در سـاختارهای ضخیم‌تر روسازی تأثیر خطای حاصل از اجرای ضخامت لایۀ آسفالت رویه بر روی خطای برآورد عمرخسـتگی و شیارشـدگی بیشـتر از سـاختارهای ضـعیف‌تـر روسـازی است. در صورتی‌که در مـورد خطـای حاصـل از اجـرای ضخامت سایر لایه‌ها (اساس و زیراساس) هر چه ساختار روسازی ضعیف‌تر باشد، این تأثیر بیشتر است. همچنـین، می‌توان دید که اجرای غیـر صـحیح ضـخامت لایـۀ بـتن آسفالتی رویه به شدت هم بر روی برآورد عمر خسـتگی و هم عمر شیارشدگی تأثیر می‌گذارد. حال آن که، اجرای ضخامت نادرست لایه‌هـای اسـاس و زیـر اسـاس تـأثیر چندانی بر روی برآورد عمر خسـتگی روسـازی نـدارد و تنها بر روی برآورد دقیق عمرشیارشدگی تأثیرگذار است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که برای وارسی دقیق عمـر خستگی باید ضخامت اجرایی لایه بتن آسفالتی رویـه بـه دقت وارسی شود و برای وارسی دقیق عمـر شیارشـدگی یاز است تا ضخامت کلیۀ لایه‌ها به‌صورت دقیـق وارسـی شود.



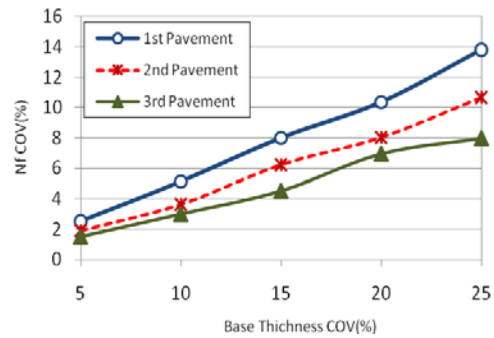
شکل ۱۲ ضریب تغییرات عمر خستگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات ضخامت لایۀ بتن آسفالتی



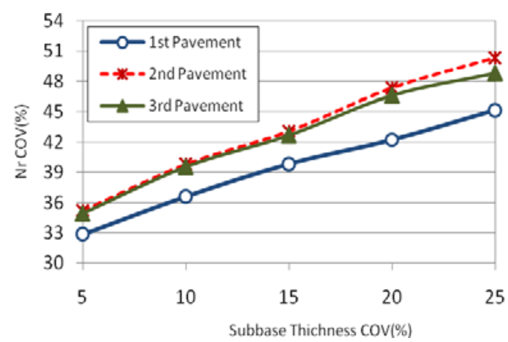
شکل ۱۳ ضریب تغییرات عمر شیارشدگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات ضخامت لایۀ بتن آسفالتی



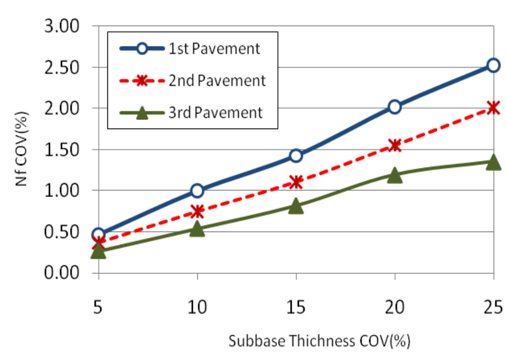
شکل ١٤ ضریب تغییرات عمر خستگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات ضخامت لایۀ اساس



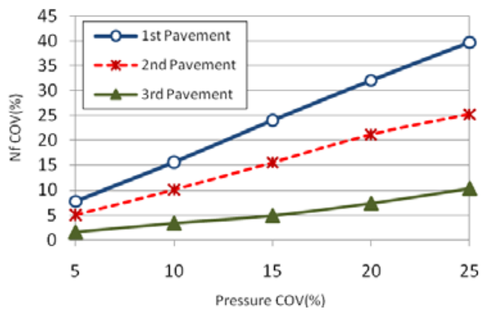
شکل ۱۵ ضریب تغییرات عمر شیارشدگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات ضخامت لایهٔ اساس



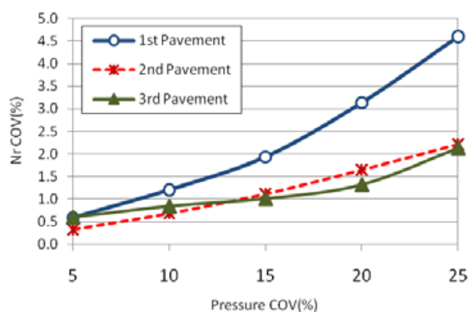
شکل ١٦ ضریب تغییرات عمر خستگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات ضخامت لایهٔ زیراساس



شکل ۱۷ ضریب تغییرات عمر شیارشدگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات ضخامت لایهٔ زیراساس



شکل ۱۸ ضریب تغییرات عمر خستگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات فشار چرخ

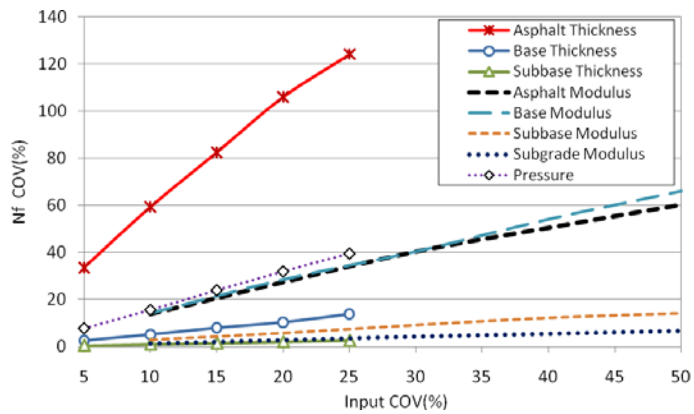


شکل ۱۹ ضریب تغییرات عمر شیارشدگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات فشار چرخ

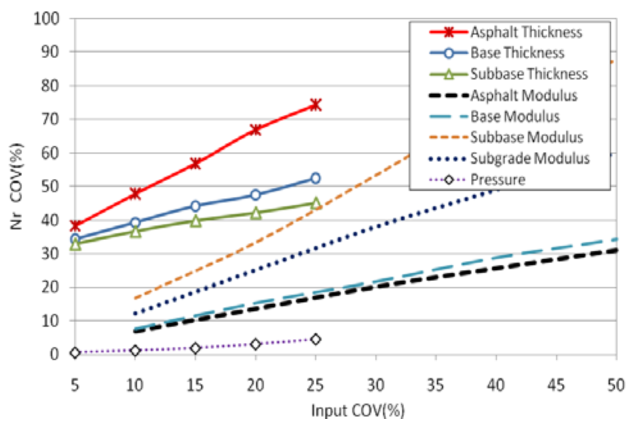
شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نشان می‌دهند که تأثیر خطای حاصل از تعیین فشار چرخ بر روی خطای برآورد عمر خستگی و شیارشدگی در روسازی‌های با ساختار ضعیف‌تر بیش از روسازی‌های با ساختار ضخیم‌تر است. بنابراین، بر خلاف روند معمول در مطالعات طراحی، در روسازی‌های با آمد وشد کمتر که دارای ضخامت کمتری می‌باشند، باید بارگذاری با دقت بیشتری برآورد شود. همچنین، دیده می‌شود که خطا در برآورد فشار چرخ تأثیر چندانی بر روی خطای پیش‌بینی عمر شیار شدگی ندارد.

همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد که تأثیر خطای حاصل از ضریب پواسون هر یک از لایه‌ها بر روی برآورد عمر خستگی و شیارشدگی روسازی بسیار کم می‌باشد و می‌توان از آن چشم پوشید.

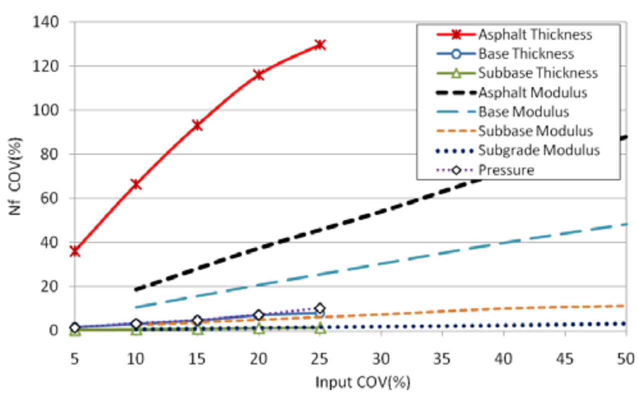
برای تعیین میزان تأثیر خطای هر یک از عامل‌های ورودی بر روی خطای برآورد عمر خستگی و شیار شدگی، شکل‌های (۲۰) الی (۲۳) ارائه شده‌اند.



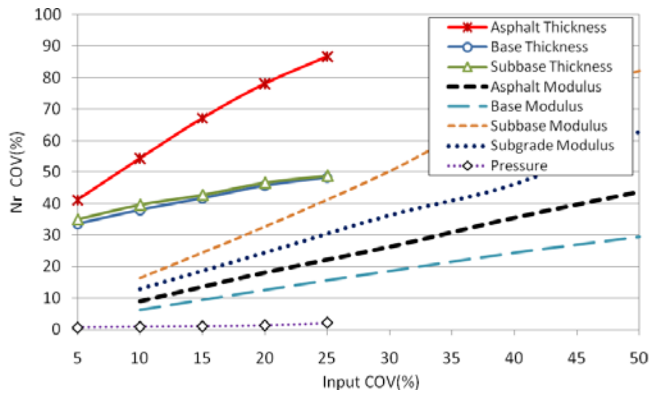
شکل ۲۰ ضریب تغییرات عمر خستگی با توجه به ضریب تغییرات ورودی‌های مختلف برای روسازی اول با ساختار ضعیف



شکل ۲۱ ضریب تغییرات عمر شیارشدگی با توجه به ضریب تغییرات ورودی‌های مختلف برای روسازی اول با ساختار ضعیف



شکل ۲۲ ضریب تغییرات عمر خستگی با توجه به ضریب تغییرات ورودی‌های مختلف برای روسازی سوم با ساختار قوی



شکل ۲۳ ضریب تغییرات عمر شیارشدگی با توجه به ضریب تغییرات ورودی‌های مختلف برای روسازی اول با ساختار قوی

جدول ۸ درجهٔ اهمیت ورودی‌های طراحی روسازی برای وارسی دقت برآورد عمر خستگی و شیارشدگی

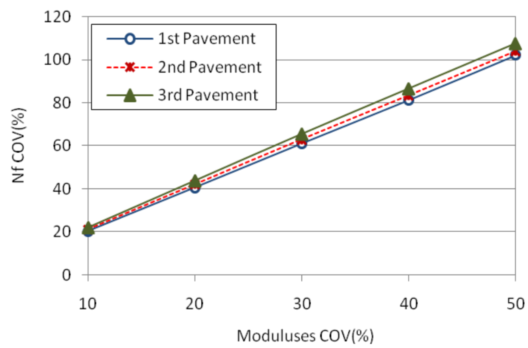
ساختار قوی		ساختار ضعیف		
عمر شیارشدگی	عمر خستگی	عمر شیارشدگی	عمر خستگی	
ضخامت آسفالت	ضخامت آسفالت	ضخامت آسفالت	ضخامت آسفالت	کاهش درجهٔ اهمیت
ضخامت زیراساس*	ضریب کشسانی آسفالت	ضخامت اساس	فشار چرخ	
ضخامت اساس*	ضریب کشسانی اساس	ضخامت زیراساس	ضریب کشسانی اساس*	
ضریب کشسانی زیراساس	فشار چرخ*	مدول ارتجاعی زیراساس	ضریب کشسانی آسفالت*	
ضریب کشسانی خاک بستر	ضخامت اساس*	مدول ارتجاعی خاک بستر	ضخامت اساس	
ضریب کشسانی آسفالت	ضریب کشسانی زیراساس	مدول ارتجاعی اساس*	ضریب کشسانی زیراساس	
ضریب کشسانی اساس	ضریب کشسانی خاک بستر	مدول ارتجاعی آسفالت*	ضریب کشسانی خاک بستر	
فشار چرخ	ضخامت زیراساس	فشار چرخ	ضخامت زیراساس	
مواردهایی که با علامت * مشخص شده‌اند، نشان دهندهٔ یکسان بودن تقریبی درجهٔ اهمیت این عامل‌ها می‌باشد.				

با توجه به شکل‌های (۲۰) الی (۲۳) می‌توان درجهٔ اهمیت هر یک از عامل‌های ورودی بر روی دقت برآورد عمر خستگی و شیارشدگی روسازی را بصورت جدول (۸) خلاصه کرد.

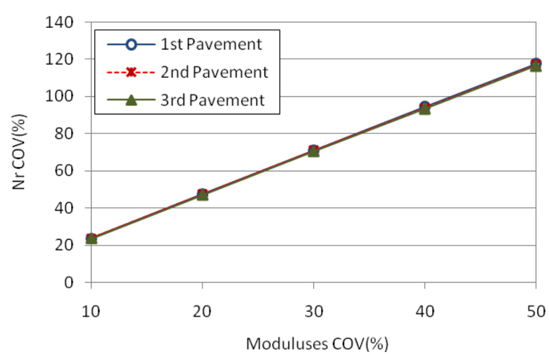
همان‌گونه که دیده می‌شود، اجرای دقیق ضخامت لایهٔ آسفالت رویه در برآورد دقیق عمر خستگی و شیارشدگی روسازی از بالاترین درجهٔ اهمیت برخوردار است. همچنین، دیده می‌شود که با توجه به ساختار روسازی درجهٔ اهمیت ورودی‌های مختلف متفاوت خواهد بود. با این وجود، در پیش‌بینی عمر شیارشدگی دقیق روسازی، اجرای دقیق ضخامت لایه‌ها بیش از تعیین دقیق ضریب کشسانی لایه‌ها اهمیت دارد. از جدول (۸) می‌توان به عنوان یک راهنمای کلی در تعیین درجه اهمیت وارسی کیفیت اجرایی ضخامت لایه‌های مختلف روسازی، تعیین ضریب کشسانی لایه‌های مختلف روسازی و برآورد بار چرخ با توجه به محدودیت‌های بودجه و تجهیزات آزمایشگاهی بهره گرفت.

تعیین وابستگی بین خطای عامل‌های ورودی و خطای پیش‌بینی عمر روسازی

برای تعیین وابستگی بین خطای برآورد ضریب کشسانی لایه‌های مختلف و خطای پیش‌بینی عمر روسازی، مقدار ضریب تغییرات ضریب کشسانی همه لایه‌ها برابر فرض شد. با توجه به تغییر این ضریب تغییرات، مقدارهای ضریب تغییرات عمر خستگی و عمر شیارشدگی روسازی محاسبه شد. نتیجه‌های این محاسبات در شکل‌های (۲٤) و (۲۵) داده شده است.



شکل ۲٤ ضریب تغییرات عمر خستگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات ضریب کشسانی همه لایه‌ها



شکل ۲۵ ضریب تغییرات عمر شیارشدگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات ضریب کشسانی همه لایه‌ها

از رابطه‌های (۸) و (۹) می‌توان برای تعیین وابستگی بین ضریب تغییرات ضریب کشسانی لایه‌های مختلف و ضریب تغییرات عمر خستگی و شیارشدگی روسازی استفاده کرد.

$$COV_{N_f} = -3.943 + 2.082COV_E + 0.332H_{AC}$$
$$R^2 = 1.000 \qquad (۸)$$

$$COV_{N_R} = 1.523 + 2.335COV_E - 0.014H_{Pav}$$
$$R^2 = 1.000 \qquad (۹)$$

در این رابطه‌ها:

COV_{N_f}= ضریب تغییرات عمر خستگی.

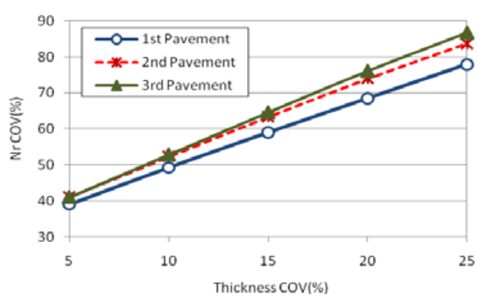
COV_{N_R}= ضریب تغییرات عمر شیارشدگی.

COV_E= ضریب تغییرات ضریب کشسانی همه لایه‌ها.

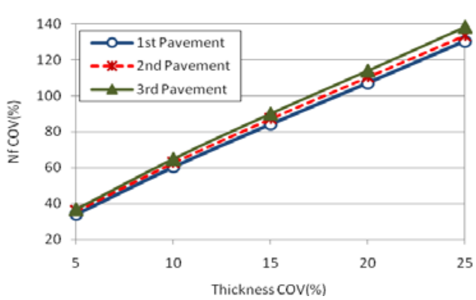
H_{AC}= ضخامت لایهٔ بتن آسفالتی به سانتیمتر.

H_{Pav}= ضخامت کل لایه‌های روسازی به سانتیمتر.

همچنین، برای تعیین وابستگی بین خطای اجرای ضخامت لایه‌های مختلف و خطای پیش‌بینی عمر روسازی، مقدار ضریب تغییرات ضخامت لایه‌های مختلف روسازی برابر فرض شد. با توجه به تغییر این ضریب تغییرات مقدارهای ضریب تغییرات عمر خستگی و عمر شیارشدگی روسازی محاسبه شد. نتیجه‌های این محاسبات در شکل‌های (۲٦) و (۲۷) آمده است.



شکل ۲٦ ضریب تغییرات عمر خستگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات ضخامت لایه‌های روسازی



شکل ۲۷ ضریب تغییرات عمر شیارشدگی روسازی با توجه به ضریب تغییرات ضخامت لایه‌های روسازی

با توجه به شکل‌های (۲۶) و (۲۷)، رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) بـرای تعیـین وابسـتگی بـین ضـریب تغییـرات ضخامت لایه‌های مختلف روسازی و ضـریب تغییـرات عمر خستگی و شیارشدگی روسازی محاسبه شده‌اند.

$$COV_{N_f} = 6.559 + 4.900 COV_{TH} + 0.442 H_{AC}$$
$$R^2 = 0.998 \quad (۱۰)$$

$$COV_{N_R} = 24.038 + 2.126 COV_{TH} + 0.088 H_{Pav}$$
$$R^2 = 0.990 \quad (۱۱)$$

که در این رابطه‌ها COV_{TH} ضریب تغییرات ضخامت همه لایه‌های روسازی است.

همان‌گونه که دیده مـی‌شـود، ایـن رابطـه‌هـا دارای ضریب رگرسیون بسیار بالا می‌باشند. با این وجـود، ایـن رابطــه‌هــا تنهــا بــا توجــه بــه ویژگــی‌هــای متوســط مصالح(ضریب کشسانی متداول مـورد اسـتفاده در ایـران بـرای طراحـی روسـازی و همچنـین ضـریب کشسـانی متوسط خاک بستر) و بارگذاری فرضی به بدست آمده‌اند. در دیگر موردهـا نیـز مـی‌تـوان بـا توجـه بـه چگـونگی بارگذاری و همچنین، ویژگی‌های خـاک بسـتر و مصـالح روسازی مختلف رابطه‌های همانندی با ضریب رگرسیون بالا به‌دست آورد تا بتوان از این رابطه‌هـا بـدون نیـاز بـه شبیه‌سازی و صرف وقت‌زیاد برای ارزیابی تـأثیر خطـای عامل‌های ورودی بر روی خطای پیش‌بینی عمر روسازی بهره گرفت.

خلاصه و نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر خطای ورودی‌های طراحی روسازی در روش مکانیکی – تجربی بر روی خطای پیش بینـی عمـر خستگی و شیارشدگی بـا اسـتفاده از روش شـبیه سـازی مونت کارلو مورد بررسی قـرار گرفتـه اسـت. بـرای ایـن منظور سه مقطع با ساختارهای قوی، متوسط و ضعیف در نظر گرفته شـده اسـت و تـأثیر خطـای عامـل‌هـای مهـم طراحـی شـامل ضـریب کشسـانی، ضـریب پواسـون و ضخامت لایه‌های مختلـف و همچنـین خطـای ناشـی از تعیین فشار چرخ بر روی خطای پیش‌بینی عمر خسـتگی و عمر شیارشدگی روسازی بررسی شده اند.

بررسی‌هـای انجـام شـده نشـان مـی‌دهنـد کـه در ساختارهای ضخیم‌تر روسـازی تـأثیر خطـای حاصـل از برآورد ضریب کشسـانی لایـه آسـفالتی بـر روی خطـای برآورد عمر خستگی و شیارشدگی بیشـتر از سـاختارهای ضـعیف‌تـر روسـازی اسـت ودر مـورد خطـای ضـریب کشسانی دیگر لایه‌ها(اساس، زیراساس و خاک بستر) هر چه ساختار روسازی ضعیف‌تـر باشـد، ایـن تـأثیر بیشـتر است. همچنین برای وارسـی دقیـق عمـر خسـتگی بایـد ضریب کشسانی لایه‌های بالایی و برای وارسی دقیق عمر شیارشدگی باید ضریب کشسانی لایه‌های زیرین بـه‌طـور دقیق تعیین و وارسی شـوند. مطالعـه انجـام شـده نشـان می‌دهد که در ساختارهای ضخیم‌تر روسازی تأثیر خطای حاصل از اجرای ضخامت لایـهٔ آسـفالت رویـه بـر روی خطـای بـرآورد عمـر خسـتگی و شیارشـدگی بیشـتر از ساختارهای ضعیف‌تر روسازی اسـت. در صـورتی‌کـه در مورد خطای حاصـل از اجـرای ضـخامت سـایر لایـه‌هـا (اساس و زیراساس) هر چه ساختار روسازی ضـعیف‌تـر باشد، ایـن تـأثیر بیشـتر اسـت. بنـابراین در سـاختارهای ضعیف‌تر روسازی باید لایه های اسـاس و زیراسـاس بـا دقت بیشتری اجرا شوند.

درباره خطای تعیین فشار چرخ، بـر خـلاف رونـد معمول در مطالعات طراحی، در روسازی‌هـای بـا آمـد و شد کمتـر کـه دارای ضـخامت کمتـری مـی‌باشـند بایـد بارگـذاری بـا دقـت بیشـتری بـرآورد شـود. زیـرا، ایـن روسازی‌ها حساسیت بیشتری بـه تغییـرات فشـار چـرخ دارند. افزون بر این، دیده می شود که از بین عامـل‌هـای ورودی طراحـی روسـازی، ضـخامت آسـفالت رویـه مهمترین عامل در وارسـی عمـر خسـتگی و عمـر شـیار شدگی روسازی است که باید به دقت اجرا شود.

در رابطه با تعیین تأثیر خطـای عامـل‌هـای ورودی

طراحی روسازی بر روی خطای پیش‌بینی عمر روسازی نیز می‌توان بر پایه مجموعه‌ای شبیه‌سازی محدود برای چندین مقطع مختلف روسازی و بر پایه بارگذاری و مقاومت فرضی خاک بستر رابطه‌هایی را به‌دست آورد که با دقت بالا ضریب تغییرات عامل‌های ورودی مانند ضریب کشسانی و ضخامت لایه‌های مختلف را به ضریب تغییرات عمر خستگی و شیارشدگی وابسته می‌کنند.

مراجع

1. Austroads, "Pavement design" , Sydney, (2004).
2. NCHRP 1-37A, "Mechanistic-empirical design of new & rehabilitated pavement structures", http://www.trb.org/mepdg/guide.htm, (2008).
3. IRC:37-2001, "Guidelines for the design of flexible pavements: 2nd revision", IRC, (2001).
4. Shell International Petroleum Company Limited, "Shell pavement design manual – asphalt pavements and overlays for road traffic", London, (1978).
5. Theyse, H. L., Beer, M., and Rust, F. C., "Overview of the South African mechanistic pavement design analysis method", Transportation Research Record, 1539, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1996, pp.6-17, (1996).
6. The Asphalt Institute, "Thickness design – asphalt pavements for highways and streets , Manual Series No. 1 (MS-1)", 9th edition, (1999).
7. LCPC and SETRA, "French design manual for pavement structures, Guide Technique, Union Des Synducates", De L'industrieRoutiere, Francaise, (1997).
8. Timm, D.H, Newcomb, D.E, Bridisson, B and Galambos, T.V., "Incorportation of reliability into the Minnesota mechanistic-empirical pavement design method", Final Report prepared to Minnesota Department of Transportation, Minnesota University, Department of Civil Engineering, Minneapolis, (1999).
9. Kim H.B, and Lee S.H.,"Reliability-based design model applied to mechanistic empirical pavement design",*KSCE Journal of Civil Engineering*, 6 (3), pp. 263-272, (2002).
10. Al-Sugair, Faisal H. and Almudaiheem, Jarnal A, "Variations in Measured Resilient Modulus of Asphalt Mixes," Journal *of Materials in Civil Engineering,* 4 (4), pp. 343-352, (1992).
11. Brown, E.R. and Foo, K.Y., "Evaluation of Variability in Resilient Modulus Test Results (ASTM D4123)", *Journal of Testing: and Evaluation,* JTEVA, 19 (1), pp. 1-13, (1991).
12. Hadley, W.O., Irick, P., and Anderson, V.,"Materials and Construction Variability Based on SHRP-LTPP Data," *Proceedings, 4& International Conference on the Bearing Capacity ofRoads and Airfields,* Vol. 2., pp. 863 - 882, (1994).

13. Allen, David, L., and Graves, R., Clark, "Variability in Measurement of In-Situ Material Properties", Proceedings, 4~ *International Conference on the Bearing Capacity of Roads and* Vol. 2., pp. 989 - 1005, (1994).
14. Noureldin, A. Samy, "Influence of Stress Levels and Seasonal Variations on In Situ Pavement Layer Properties", Transportation Research Record No. 1448, Transportation Research Board, pp. 16-24, (1994).
15. Richard, N., Stubstad, Shiraz, D., Tayabji, Erland, O., Lukanen, LTPP Data Analysis: Variations in Pavement Design Inputs, Final report prepared to National Cooperative Highway Research Program, (2002).
16. Yoder, E. and Witczak, M., "Principles of Pavement Design", 2nd Edition, JohnWiley & Sons, Inc., New York, (1975).
17. Das, Braja M., "Principles of Geotechnical Engineering", Third Edition, PWS Publishing Company, Boston, (1994).
18. Attoh-Okine, NiiOtokunor and Roddis, W.M., "Pavement Thickness Variability and Its Effects on Determination of Moduli and Remaining Life", Transportation Research Record No. 1449, Transportation Research Board, pp. 39-45, (1994).
19. Noureldin, A. Samy, Sharaf, Essam, Arafah, Abdulrahim and Al-Sugair, Faisal, "Estimation of Standard Deviation of Predicted Performance of Flexible Pavements Using AASHTO Model", Transportation Research Record No. 1449, Transportation Research Board, pp. 46-56, (1994).
20. Kwang, Kim, Woo, and Burati, James, L., Jr, "Probabilistic Approach to Evaluating Critical Tensile Strength of Bituminous Surface Courses", Transportation Research Record No. 1 171, Transportation Research Board, pp. 13 1-138, (1988).
21. Hoffman, P., "The Man Who Loved Only Numbers: The Story of Paul Erdos and the Search for Mathematical Truth", New York: Hyperion, pp. 238-239, (1998).

۲۲. غنی زاده. علیرضا، " استفاده از کلاس ClassLESA برای تحلیل سیستم‌های کشسان چند لایه‌ای"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، (۱۳۸۷).